5Б

УДК 004.942

А.В. Бухановский, С.В. Иванов, Ю.И. Нечаев
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия
boukhanovsky@mail.ifmo.ru

Интерпретация динамики взаимодействия судна с экстремальной волной в бортовой интеллектуальной системе

Обсуждается проблема контроля критической ситуации, связанной с воздействием на судно экстремальной волны. Особое внимание уделяется анализу особенностей взаимодействия в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.

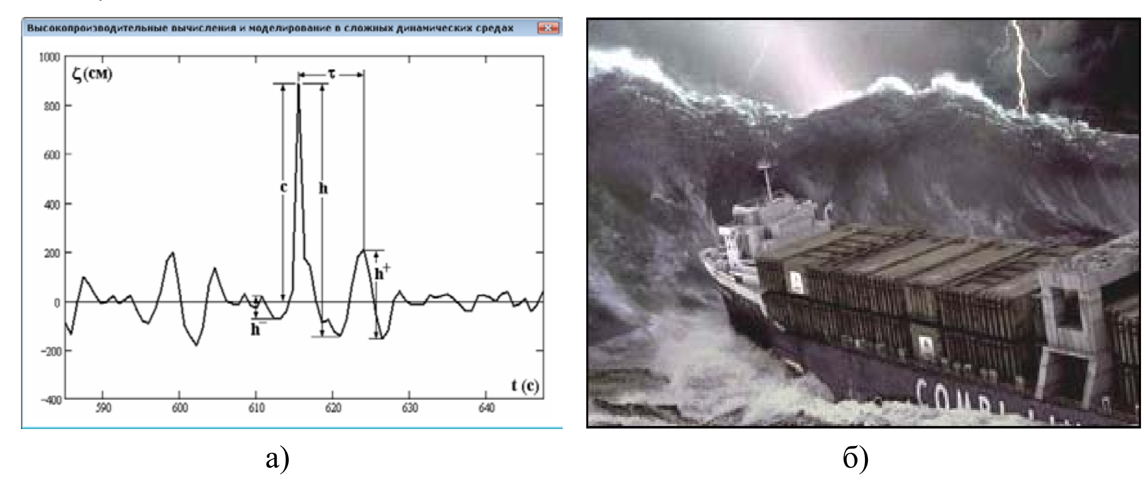
Введение

Создание интеллектуальных систем (ИС) новых поколений в значительной степени определяется уровнем интеллектуальности, достижение которого открывает возможности проектирования систем, функционирующих в условиях неопределенности [1-27]. Особенно важно это в нештатных ситуациях, которые возникают при воздействии экстремальных волн огромной разрушительной силы. При взаимодействии с внешней средой судно, как сложный динамический объект (ДО), подвергается возмущениям, которые заранее трудно предусмотреть при создании системы. Это накладывает дополнительные требования к обработке измерительной информации. Дефицит времени на принятие решения по обеспечению безопасности ДО приводит к необходимости выделения только той информации, которая требуется для выполнения основной задачи управления и принятия решений. Возникает проблема предварительного отбора и анализа информации, необходимой для реализации механизма логического вывода и выработки практических рекомендаций. Решение этой проблемы требует создания эффективных алгоритмов и процедур обработки информации, поступающей с датчиков измерительной системы. Рассматриваемая ИС обеспечивает оперативный контроль текущей ситуации. На основе данных динамических измерений необходимо построить эффективный прогноз и реализовать управление. Вся другая информация имеет смысл только на этапах предварительного анализа при построении ИС [3], [5].

Ниже рассмотрена одна из наиболее сложных и трудноформализуемых задач, решаемых при интеллектуальной поддержке оператора ИС – оценка поведения судна при воздействии экстремальной волны в сложной динамической среде, характеризующейся полной неопределенностью как объекта моделирования, так и динамики внешней среды. Крупные волны в Мировом океане встречаются достаточно часто и представляют грозную опасность для судоходства. Вместе с тем среди экстремальных волн можно выделить гигантские волны огромной разрушительной силы, параметры которых не соответствуют общепринятым представлениям о ветровых волнах. Это так называемые «необычные» волны или «волны-убийцы». В англоязычных публикациях такие волны получили название «freak waves», «rogue waves» или даже «killer-

waves», т.е. «волны-убийцы». Под «волной-убийцей» понимают внезапно возникающую интенсивную волну, которая значительно превышает (в 2 и более раз) значительную высоту фонового волнения (рис. 1).

Внезапность и большая энергия таких волн неоднократно приводили к гибели судов и морских сооружений. Долгое время считавшиеся фантазией мореплавателей, «волны-убийы» стали объектом серьезного изучения после участившихся случаев регистрации подобных волн на обширных акваториях океанов и морей. Наиболее известным примером «волны-убийцы» стала так называемая «новогодняя волна», зарегистрированная на нефтяной платформе Экофиск (56,5 с.ш., 30,2 в.д.) в Северном море 1 января 1995 года. Эта необычная волна имела высоту 25,6 м, гребень 18,5 м, ложбину 7,1 м.



а) б)

Рисунок 1 – Параметризация необычной волны по данным измерений.
(Черное море, 16 декабря 2000 г.) (а);
динамическая картина взаимодействия в экстремальной ситуации (б)

В течение длительного времени наиболее распространенной точкой зрения являлась некоторая исключительность акваторий, где возможны необычные волны, образующиеся, главным образом из-за наличия встречного течения для волноопасных направлений, резкого свала глубин и т.п. Однако по мере накопления данных о встречах с «волнами-убийцами» географический фактор теряет свою уникальность и уступает место принципу возможности встречи с этой волной на всем пространстве Мирового океана.

Исследование воздействия «волны-убийцы» на суда и плавучие технические средства освоения океана требует кардинальной модификации математической модели за счет включения в нее механизмов описания дополнительных эффектов, не учитываемых обычной гидродинамической моделью взаимодействия в условиях существенной неопределенности задачи. Физические закономерности и необычная структура «волны-убийцы» порождают ряд проблем, решение которых возможно только на базе новых концепций и упрощающих предположений.

Формулировка теоретической базы исследования динамики взаимодействия с «волной-убийцей» ведется с учетом физических картин взаимодействия судна с внешней средой. Это позволяет прояснить особенности поведения судна и избежать многих трудностей при решении проблемы методологического барьера – нелинейности, многомерности, многосвязности [3], [9], [11], [13], [17]. На основе такой формализации может быть построено математическое описание поведения судна как нелинейной динамической системы, определяющей процесс восприятия судном возникающих динамических нагрузок.

Нечеткая формальная система

Формализация понятий и знаний о динамике взаимодействия судна с внешней средой при реализации системы информационной поддержки оператора бортовой ИС достигается на основе теории нечетких множеств [1]. Нечеткие отношения

$$R = A \rightarrow B, \tag{1}$$

заданные между входной областью X и выходной областью Y в виде нечеткого подмножества прямого произведения X×Y, определяются по формуле

$$R = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left\{ \left(\mu_R(x_i, y_j) \mid (x_i, y_j) \right) \right\}, \tag{2}$$

где $X = \{x_1,\ldots,x_n\}$ – область посылок (антецедент импликации); $Y = \{y_1,\ldots,y_m\}$ – область заключений (консеквент импликации); $\mu_R(x_i,y_j)$ – функция принадлежности (ФП) (x_i,y_j) нечеткому отношению R; $\mu_R(x_i, y_j) \in [0,1]$; знак $\sum$ означает совокупность (объединение) множеств.

Для продукционных правил, использующих нечеткие множества $A(A\subset X)$ и $B(B\subset Y)$, один из распространенных способов построения нечеткого соответствия имеет вид:

$$R = A \times B = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left\{\left(\mu_A(x_i) \wedge \mu_B(y_i) \mid (x_i, y_j)\right)\right\} \tag{3}$$

или

$$\mu_R(x,y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min(\mu_A(x) \wedge \mu_B(y), \tag{4}$$

где $\mu_A(x)$ и $\mu_B(y)$ – ФП элементов x,y множествам A и B.

Алгоритмы нечеткого вывода в основном различаются видом используемой операции нечеткой импликации. В бортовом вычислительном комплексе находят применение различные модели нечеткого вывода, основанные на расширении принципа композиции Л. Заде [27]. В основном это модели Мамдани и Сугено [3].

Рациональный учет особенностей поведения судна под воздействием внешних возмущений требует разработки системы критериальных оценок, обеспечивающих проверку безопасности судна в рассматриваемой экстремальной ситуации в виде глобальной и локальной систем нормирования [5]. Глобальная система критериев включает национальные и международные требования, которые обеспечиваются независимо от типа судна. Локальная система разрабатывается в процессе создания системы знаний и учитывает характерные особенности исследуемого судна, основанные на более совершенных методах формализации информации с учетом ее неполноты и неопределенности в рамках концепции «мягких вычислений» [27]. Однако контроль динамики судна при воздействии волны-убийцы имеет свои особенности, а обычные критерии остойчивости не могут гарантировать безопасность судна в этой экстремальной ситуации.

Следует отметить, что ситуация, связанная с ударом волны-убийцы, имеет некоторое сходство с ситуацией возникновения «брочинга» [3], [12], [21] в том смысле, что никакие действия судоводителя в момент возникновения этой ситуации не могут привести к обеспечению безопасности. Поэтому при формализации знаний в бортовых ИС целесообразно предусмотреть логическую систему, обеспечивающую прогноз возникновения волны-убийцы в заданных внешних условиях, а также сценарии поведения судна под ее воздействием.

Рассмотрим некоторые общие соображения об особенностях преобразования информации при построении нечеткой формальной системы, обеспечивающей при-

нятие решений на основе анализа альтернатив. При построении формальной системы на основе имеющейся информации введем в рассмотрение множество векторов, характеризующих конкретную альтернативу (ситуацию):

$$R^n : K = (x_1,\dots, x_n) \rightarrow R^n, \qquad (5)$$

где $x_1,\dots, x_n$ – признаки, выделенные в процессе анализа измерительной информации.

Таким образом исходная информация о динамике ветроволновых полей может быть представлена структурой, определяемой пространство принятия решений. Число возможных значений лингвистических переменных (мощность терм-множеств) определяется в процессе предварительного анализа при построении матрицы стратегических решений [3], [23]. Формализованное описание лингвистической переменной (показателя состояния динамической системы) представляет собой упорядоченную совокупность:

$$< A_S, T = \{\eta, \gamma, \mu_i(x)/x\}, X >, \qquad (6)$$

где A_S – наименование состояния; T – терм-множество (множество состояний) лингвистической переменной: η – имя нечеткой переменной; γ и $\mu_i(x)/x$ – ее базовая шкала и функция принадлежности; X – базовая шкала лингвистической переменной.

Формализация пространства принятия решений как нечеткой системы осуществляется на базе представления знаний об исследуемой предметной области в виде совокупности нечетких формальных систем и переходов между ними [23]. Нечеткая формальная система учитывает динамику изменения предметной области и представляется в виде матрицы переходов, строками которой являются пары

$$(\mu S_i, <T_i, S_j>; I = 1,\dots,n; j = 1,\dots, m), \qquad (7)$$

где μSi – расширенная нечеткая формальная система; $<T_i,S_j>$ – пара, задающая максиминную операцию, используемую в основе композиционного правила вывода (обобщенный *modus ponens*); T_i – оператор минимума (Т-норма); Sj – оператор максимума (Т-конорма).

Условия переходов определяются при разработке формальной системы. При этом возможны переходы от одной расширенной нечеткой формальной системы к нескольким подобным системам, которые могут создаваться и удаляться в процессе моделирования динамики системы, определяющей конкретный ветроволновой режим.

Интерпретация поведения судна в рассматриваемой экстремальной ситуации

Предлагаемый ниже подход к формализации задачи основан на использовании синергетической парадигмы [6], [8], [10], [19], [20], [24]. Интерпретация поведения судна, как сложной динамической системы (рис. 2), проведена в терминах синергетической теории управления [8]:

1. Предполагается, что судно, как динамическая система, под воздействием внешнего возмущения «стартует» из некоторого исходного состояния, характеризуемого множеством начальных условий фиксированной размерности и через определенное время неизбежно попадает на формирующийся аттрактор – притягивающее множество, которое имеет значительно меньшую размерность фазового пространства.

2. Эволюция сложной динамики – процесс сжатия фазового пространства, отражает особенности самоорганизации системы, развитие которой происходит в течение чрезвычайно ограниченного периода времени и может быть описано модифицированными математическими моделями поведения судна в различных фазах взаимодействия.

3. Расчетная схема использования синергетической парадигмы при оценке поведения судна при воздействии экстремальных волн может быть построена на базе стандартных соотношений, используемых в синергетической теории управления, и математических моделей, описывающих различные фазы эволюции системы в процессе движения к целевому аттрактору.

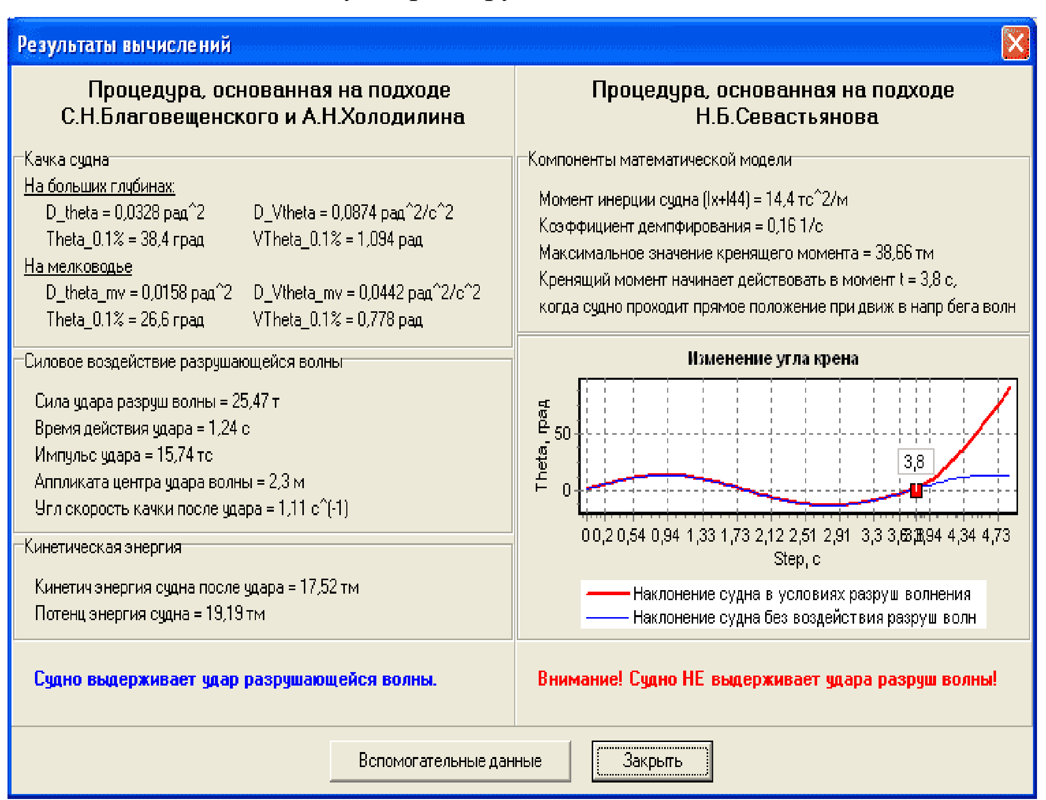


Рисунок 2 – Результаты моделирования при времени действия удара разрушающейся волны (время действия удара 1,24 с) [3]

Особенность использования синергетического подхода при анализе динамики судна в критической ситуации, связанной с воздействием экстремальных волн, состоит в универсальности методов исследования. Благодаря бифуркации нелинейность процессов самоорганизации определяет многовариантность путей развития системы. При этом принцип подчинения сужает диапазон величин, изменение которых с течением времени определяет процесс самоорганизации. Несмотря на то, что исследуемая динамическая система имеет сложный характер и требует учета многих переменных, применение принципа самоорганизации позволяет ограничиться лишь небольшим числом самых важных параметров – параметров порядка, чтобы эффективно наблюдать за развитием системы.

Геометрическая и аналитическая интерпретация ситуации с позиций теории катастроф

Общая расчетная схема оценки динамики судна в рассматриваемой задаче на основании сформулированной гипотезы представляет собой достаточно громоздкую расчетную схему, реализуемую в мультипроцессорной вычислительной среде и предусматривающую последовательную проверку безопасности судна в трех последовательных стадиях развития экстремальной ситуации. Эволюция системы в этих ста-

диях характеризуется постепенным уменьшением числа степеней свободы и формированием аттракторных множеств. В завершающей стадии развития эволюции при реализации эффективного управления может быть достигнуто возникновение целевого аттрактора. Если динамические нагрузки от удара экстремальной волны окажутся катастрофическими, то в процессе эволюции будет реализована критическая ситуация, приводящая к опрокидыванию судна.

В качестве иллюстрации динамики судна, воспринимающего удар экстремальной волны, рассмотрим моделирование этой ситуации на основе модифицированной модели, разработанной на основе методов теории катастроф [2], [4], [7], [18], [22]. Динамическая модель катастрофы, отображающая поведение сложного объекта, может быть представлена в виде кортежа:

$$DM(Cat) = < H(Cat), A(Cat) >, \qquad (8)$$

где H(Cat) – компонента, интерпретирующая динамическую среду на основе геометрической модели катастроф; A(Cat) – компонента, интерпретирующая динамическую среду на основе аналитической модели катастроф.

Геометрическая интерпретация физической картины взаимодействия на основе компоненты H(Cat) имеет вид:

$$H(Cat) = < B(\theta, t), GZ((\theta, t), C(\theta, t) >, \qquad (9)$$

где $B(\theta,t)$ – бифуркационное множество, представляющее собой образ особого множества в пространстве управляющих параметров; $GZ(\theta,t)$ – множество, отображающее динамическую среду, интегрирующую влияние внешних возмущений и особенностей динамики объекта; $C(\theta,t)$ – множество, отображающее структурные изменения в форме подводной части корпуса, вызванные непрерывным изменением конфигурации действующей ватерлинии.

Аналитическая интерпретация физической картины взаимодействия на основе компоненты A(Cat) имеет вид:

$$A(Cat) = < A(CR), A((PH), A(NF) >, \qquad (10)$$

где A(CR) – математическая модель, отображающая оценку динамической среды на основе критериальных соотношений, разработанных в рамках стандартных алгоритмов исследуемой проблемной области; A((PH) – математическая модель, отображающая оценку динамической среды на фазовой плоскости с помощью теории стохастических систем, теории детерминированного хаоса и синергетической парадигмы; A(NF) – математическая модель, отображающая оценку динамической среды на основе нейронечеткой системы.

Геометрическая интерпретация сложной динамической системы для модифицированной модели сборки представлена на рис. 3.

Применим типичную для рассматриваемого случая взаимодействия катастрофу сборки и рассмотрим возможные сценарии развития ситуации в рамках синергетической парадигмы:

– удар экстремальной волны при полном погружении судна, которое можно рассматривать как некоторое подводное судно с необычной формой корпуса и использовать модель взаимодействия, изображенную на рис. 4 а;

– развитие стремительного дрейфа вследствие удара экстремальной волны (рис. 4 б); результирующая нагрузка от гидродинамических сил в этой ситуации образует кренящий момент относительно ЦТ системы; величина этого момента непрерывно увеличивается в процессе развития дрейфа, что приводит к возникновению катастрофического крена или опрокидыванию судна.

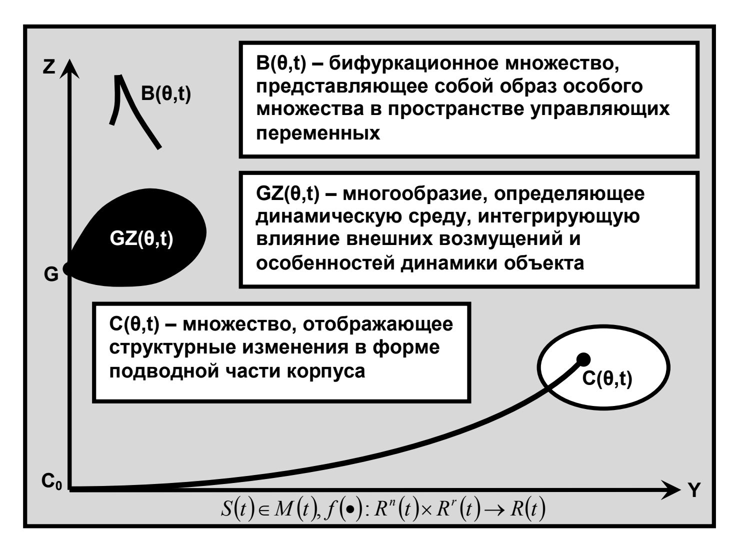
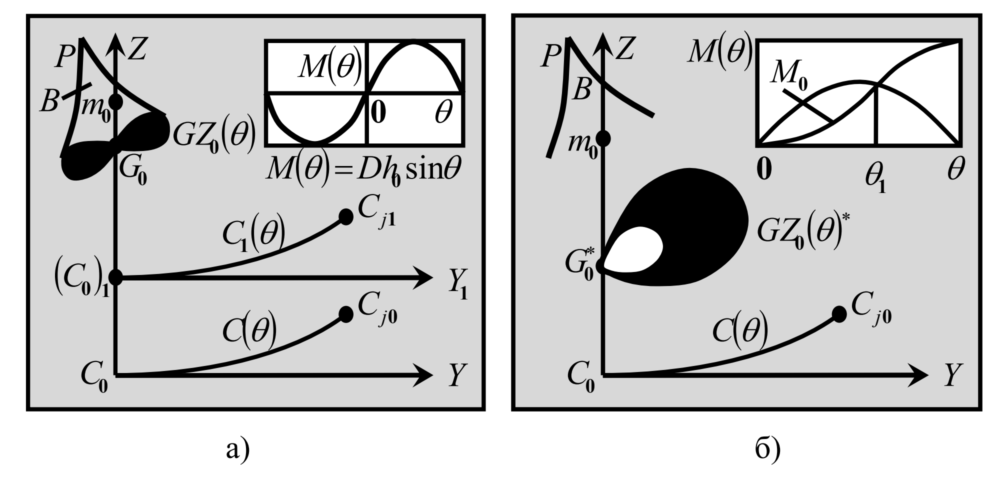


Рисунок 3 – Динамическая модель катастрофы сборки: геометрическая интерпретация



а) б)

Рисунок 4 – Топологические картины взаимодействия судна с экстремальной волной: а) – в момент удара; б) – после удара

Как видно рис. 4 а), при таком сценарии происходит полная перестройка топологической картины катастрофы сборки. Характерные точки G, C_0, m_0, P и область бифуркационного множества B изменяют свое положение. При этом восстанавливающий момент создается за счет положительной метацентрической высоты $M(\theta) = Dh_0\sin\theta$. В идеальном случае (судно с круговыми обводами) метацентр m_0 и центр величины (ЦВ) C_0 совпадают и находятся в центре круга. Если судно выдерживает удар, то возникает ситуация, описанная в следующем сценарии.

После восприятия удара снова происходит перестройка топологической картины катастрофы сборки (рис. 4 б)). ЦТ системы располагается в точке G_0*, и множество, отображающее динамическую среду, приобретает вид GZo(θ)* (светлая область). Диаграмма остойчивости M(θ) в этих условиях формируется на основе обычных моделей преобразования информации и приобретает вид, показанный в правой верхней части экрана на рис. 4 б).

Топологическая картина ситуации, определяющей стремительный дрейф (рис. 5), принципиально отличается от обсуждаемой выше. Действительно, после восприятия удара происходит перестройка картины взаимодействия, расчет которой выполнен в рамках гипотезы квазистационарности. Судно, вовлеченное в стремительный дрейф, совершает эволюцию по пространственной траектории, проекция которой на плоскость

YZ приведена на рис. 5. Здесь точками G_1,G_2,G_3 фиксируются положения ЦТ системы. Каждому такому состоянию системы соответствуют текущие значения характерных точек и областей топологической картины, типичной для надводного судна. ЦТ и ЦВ непрерывно изменяют свое положение. При этом формируется множество, отображающее динамическую среду GZ(θ) и область изменения восстанавливающего момента M(θ), которая трансформируется за счет многих неблагоприятных факторов вследствие сложной картины нелинейного взаимодействия, и в первую очередь – влияния воды на палубе от эффекта разрушения волны после удара.

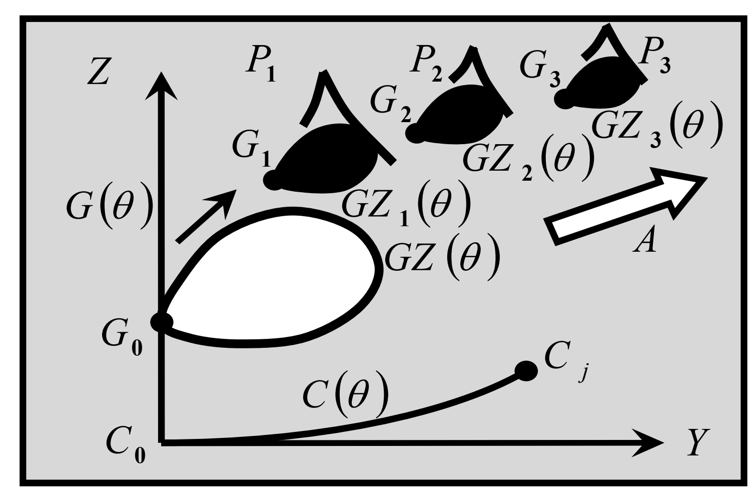


Рисунок 5 – Топологическая картина взаимодействия, отображающая движение судна в процессе эволюции под воздействием экстремальной волны

Аналитическая интерпретация динамической картины взаимодействия в условиях стремительного дрейфа напоминает рассмотренную ранее картину для случая разрушающейся волны (рис. 4 б), но с другими характеристиками диаграммы остойчивости M(θ) и кренящего момента M_0. Однако принципиальные моменты взаимодействия для рассматриваемой ситуации сохраняются: угол θ_1 здесь также характеризует неустойчивое положение равновесия при равенстве моментов M(θ) и M_0 в точке θ_1, а дальнейшее увеличение крена θ и опрокидывания происходят вследствие значительной величины кренящего момента и резкого снижения ординат диаграммы M(θ). Проверка адекватности используемых математических моделей при анализе этой чрезвычайно сложной практической задачи ведется на основе специально разработанного подхода. Для этого был использован стенд, оборудованный в гидродинамическом испытательном центре на основе функционирования виртуальной лаборатории интеллектуальной GRID-системы [15].

Анализ альтернатив и окончательный выбор решения по управлению судном с соответствующей оценкой риска в каждом из разработанных сценариев взаимодействия в рассматриваемой экстремальной ситуации ведутся на основе метода анализа иерархий [24] с использованием матрицы риска [25].

Работа выполняется в рамках проектов «Интеллектуальная система навигации и управления морским динамическим объектом в экстремальных условиях эксплуатации», «Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики корабля в экстремальных условиях эксплуатации» и «Интеллектуальные технологии поддержки процессов исследовательского проектирования судов и технических средств освоения океана» по направлениям «Создание интеллектуальных систем навигации и управления» и «Судостроение» в рамках программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / [Аверкин А.Н., Батыршин А.Н., Блишун А.Ф. и др.] ; под ред. Д.А. Поспелова. – М. : Наука, 1986.
2. Арнольд В.И. Теория катастроф / Арнольд В.И. – М. : Наука, 1990.
3. Бортовые интеллектуальные системы. Книга 2. – М. : Радиотехника, 2006.
4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф : в двух книгах / Гилмор Р. – М. : Мир, 1984.
5. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / [под ред. Ю.И. Нечаева]. – Санкт-Петербург : ГМТУ, 2001.
6. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего / Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. – М. : Наука, 1997.
7. Касти Дж. Большие системы: связность, сложность и катастрофы / Касти Дж. – М. : Мир, 1982.
8. Колесников А.А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза / Колесников А.А. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007.
9. Красовский А.А. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта / А.А. Красовский, А.И. Наумов // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 1. – С. 69-75.
10. Лоскутов А.Ю. Введение в синергетику / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. – М. : Наука, 1990.
11. Макаров И.М. Теория принятия решений / Макаров И.М. – М. : Наука, 1986.
12. Нечаев Ю.И. Моделирование остойчивости на волнении / Нечаев Ю.И. – Л. : Судостроение, 1989.
13. Нечаев Ю.И. Нелинейная динамика и парадигмы вычислений при анализе экстремальных ситуаций / Ю.И. Нечаев // Материалы Международной конференции [«Леонард Эйлер и современная наука»]. – РАН. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 385-390.
14. Нечаев Ю.И. Интеллектуальные технологии – проблемы и перспективы / Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии. – 2009. – № 1(1). – С. 5-9.
15. Нечаев Ю.И. Концепция и методологические основы создания интеллектуального базиса грид-систем / Ю.И. Нечаев, А.В. Бухановский, В.Н. Васильев // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 54. – С. 13-28.
16. Новые концепции общей теории управления // Сб. научных тр. / под ред. А.А. Красовского. – Москва ; Таганрог, 1995.
17. Осипов Г.С. Динамические интеллектуальные системы / Г.С. Осипов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 47-54.
18. Постон Т. Теория катастроф / Т. Постон, И. Стюарт. – М. : Мир, 1980.
19. Прокопчук Ю.А. Интеллектуальное синергетическое управление динамическими системами / Ю.А. Прокопчук // Искусственный интеллект. – 2009. – № 4. – С. 12-21.
20. Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов. – М. : Прогресс – Традиция, 2000.
21. Справочник по теории корабля. – Л. : Судостроение, 1985. – Т. 2.
22. Томпсон Дж. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике / Дж. Томпсон. – М. : Мир, 1985.
23. Тихомиров В.А. Концептуальные положения модели динамического времени в контексте информационных технологий / В.А. Тихомиров, Вл.А. Тихомиров // Программные продукты и системы. – 2003. – № 2. – С. 13-17.
24. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Хакен Г. – М. : Мир, 1985.
25. Egorov G.V. Risk theory based minimization of transport fleet influence on the environment / G.V. Egorov // Proceedings of Second International conference of navy andshipbuilding Nowadays NSN-2001. – St.-Petersburg. KSRI, 2001. – P. 190-197.
26. Saaty T. Mathematical models of control and disarmament / Saaty T. – J.Wiilley & Sons. Inc, 1968.
27. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing / L. Zadeh // Commutation on theASM-1994. – Vol. 37, № 3. – P. 77-84.

A.V. Boukhanovsky, S.V. Ivanov, Yu.I. Nechaev

Interpretation of Dynamic Interaction of the Ship with Extreme Wave on the Base Onboard Intelligence System

The problem of the control of a critical situation connected to influence of extreme waves on sea floating object is considered. The special attention is given to the analysis of features of interaction of objects with external environment in conditions of uncertainty and incompleteness of the information.

Статья поступила в редакцию 21.07.2010.